

آنالیز غیرخطی پل های صندوقه ای بتنی تحت اثر بارهای حرارتی

علیرضا رهایی
دانشیار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

اثر تغییرات درجه حرارت بر پل های صندوقه ای که عموماً از مصالح بتن پیش تنیده ساخته می شوند قابل ملاحظه بوده و باید با توجه به رفتار غیر خطی مصالح مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعات انجام شده مدل هایی از پل های پیوسته بتنی انتخاب و با استفاده از روش اجزاء محدود تحت بار حرارتی و ترکیب بارهای واقعی، اثر پیش تنیدگی و بار حرارتی به دو روش خطی و غیر خطی آنالیز شده اند. همچنین مدل هایی از پل های واقعی که نتایج اندازه گیری تغییر شکل آنها تحت اثر بارهای حرارتی موجود است نیز مورد مطالعه قرار گرفته و مقادیر حاصل از آنالیز غیرخطی با مقادیر اندازه گیری شده در عمل مقایسه شده است. در پایان ضمن مقایسه تغییرات خیز وسط دهانه، عکس العمل تکیه گاهی و توزیع تنش در ارتفاع مقطع در حالت های مختلف، یک نمودار پیشنهادی تغییرات درجه حرارت در ارتفاع مقطع برای طراحی پل ها پیشنهاد شده است.

Nonlinear Analysis of Box Girder Bridges Under Thermal Loads

Alireza Rahai
Associate Professor

Civil. Eng. Dept.
Amirkabir University of Technology

Abstract

The effects of temperature differences on the behavior of box-girder bridges which are generally constructed of prestressed concrete materials have been investigated.

Various models of continuous concrete bridges have been selected and the effects of thermal load on their behavior and shape have been studied using finite element method. The study has been performed using nonlinear and linear approaches and results are compared with corresponding experimental results. Comparing support reaction and stress distribution within the vertical bisection, a diagram for temperature distribution along the vertical bisection has been proposed for bridge design.

۱- مقدمه

استفاده از مصالح بتنی باتوجه به خواص مکانیکی و دوام مناسب، در اجرای پل ها، بسیار متداول است. در عمل پل های چند دهانه بزرگ عمدتاً به صورت پیوسته و با مقطع جعبه ای از مصالح بتن پیش تنیده اجرا می گردند. یکی از روش های اجرایی متداول برای این پل ها روش طره ای است که در آن اجزای عرشه پل به تدریج و از سوی هر پایه به هم متصل شده و در انتها کنسول های پیش آمده از پایه های مختلف به هم متصل می گردند.

عرشه این پل ها چه در فاز اجرا که غالباً بدون پوشش می باشد، و چه در حالت سرویس که عمدتاً از یک لایه آسفالتی پوشیده شده در فصول مختلف در معرض تابش آفتاب می باشد. همچنین در فصل زمستان، پل های واقع در مناطق سردسیر، روزهای متوالی پوشیده از برف باقی می مانند. بدین ترتیب درجه حرارت سطوح فوقانی بیش یا کمتر از سطوح تحتانی شده و اختلاف درجه حرارت حاصله باعث ایجاد نیروهای داخلی اضافی در طول پل ها می شود. در تحقیقات جدید انجام گرفته آثار حرارتی با فرض رفتار غیرخطی برای مصالح بتنی مورد بررسی قرار گرفته و ضمن مقایسه بانتایج تحقیقات قبلی، یک نمودار تغییرات درجه حرارت تپ برای طراحی پل ها پیشنهاد شده است.

۲- روش آنالیز

آنالیز مدل های انتخابی با استفاده از دو روش خطی و غیر خطی انجام شده و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه گردیده است. در حالت اول براساس روابط الاستیسیته به عنوان مبنای تئوریک مطالعات، برای یک پل با طول نامحدود و مقطع ثابت اگر توزیع درجه حرارت مستقل از محور Z (طولی) فرض شود، تغییر شکل در جهت این محور صفر فرض شده و رابطه کلی تغییر شکل با توجه به آثار حرارتی به صورت:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{a_t E}{1-\nu} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0$$

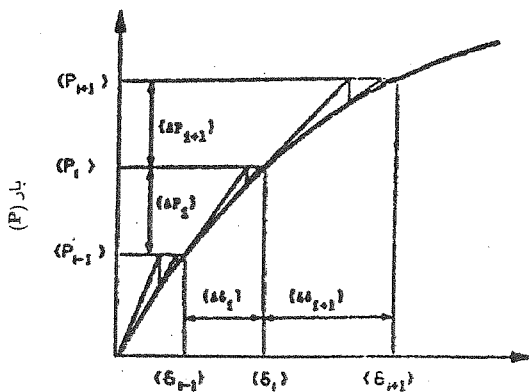
در نظر گرفته می شود. در این رابطه a_t ضریب انبساط حرارتی و E و ν ضرایب ارتجاعی و پواسون می باشند. اگر از تغییرات T در جهت عرض صندوقه (محور) در آنالیز حرارتی صرف نظر شود، رابطه فوقی به صورت:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{a_t E}{1-\nu} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

ساده می گردد. این رابطه یک بار برای محاسبه تنش های اعضای افقی و یک بار برای تنش های اعضای قائم حل شده (σ_{yy} , σ_{xx}) و با استفاده از این تنش ها، نیروهای داخلی مربوطه محاسبه می گردند.

آنالیز خطی و غیرخطی پل تحت بارهای حرارتی را می توان با استفاده از روش های عددی (روش اجزاء محدود) انجام داد. در تحلیل غیرخطی ضمن منظور نمودن اثر ترک خوردگی مقاطع بتنی، رفتار غیرخطی مصالح (از نظر مقاومتی) در نظر گرفته می شود. در تحقیقات انجام گرفته با استفاده از روش اجزاء محدود، بتن و فولاد به صورت دوسری المان مجزا تعریف شده اند که المان های فولاد در محل گره ها به المان های بتنی متصل می گردند.

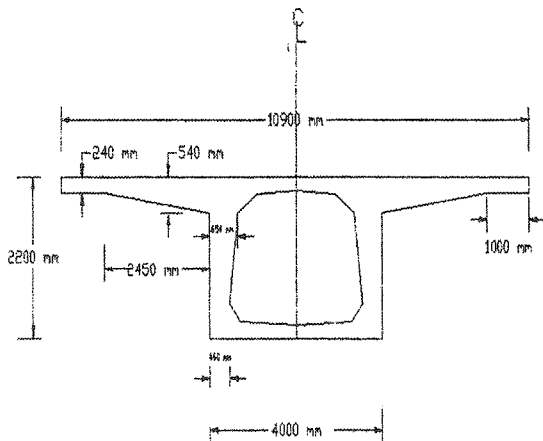
بدین ترتیب اندرکنش بتن و فولاد به صورت سازگاری گره ها در نظر گرفته می شود. برنامه کامپیوتری مورد استفاده قادر به بررسی رفتار سازه در طول زمان و تحت اثر بارهای استاتیکی، سیکلیک و حرارتی می باشد. برای دنبال نمودن مسیر غیرخطی رفتار سازه در مراحل مختلف اعمال نیرو از روش سختی مماسی (Tangentstiffness) استفاده شده است. بارها در مراحل مختلف و به مرور بر سازه اعمال شده و در هر مرحله سختی مماسی برای رسیدن به یک حالت تعادل رضایت بخش اصلاح می گردد.



تغییر شکل (σ)
شکل (۱) روش رشد-تکراری

مدل مطالعاتی: یک پل دو دهانه پیوسته مطابق شکل (۲) به عنوان مدل مطالعاتی مورد بررسی قرار می‌گیرد برای این مدل دو نوع بارگذاری به صورت: - بار حرارتی - ترکیب بارهای دائمی، نیروی پیش تنیدگی و بار حرارتی

در نظر گرفته شده و با توجه به تقارن کامل، کلیه حالت‌های بارگذاری، نیمی از مقطع پل، مورد مطالعه واقع می‌شود. شکل (۳) نحوه المان بندی تاوهای فوقانی و تحتانی و جان پل را نشان می‌دهد. جدول (۱) پارامترهای انتخابی برای مدل را نشان می‌دهد.



شکل (۲) مقطع عرضی پل

برای مدل نمودن بتن، از المان‌های چهاروجهی تنش مسطحه (با چهار گره و دو درجه آزادی) استفاده شده است. در مورد فولاد با توجه به تمرکز میل‌گردها یا کابل‌ها در نقاط مختلف سازه، المان‌های میله‌ای به کار گرفته شده است. المان میله‌ای نمایانگر یک گروه مفتول است که دو نقطه مورد نظر از شبکه را به هم متصل می‌کند. کرنش متوسط المان‌های میله‌ای معادل کرنش متوسط بتن محصور کننده المان بوده و بدین ترتیب هیچگونه لغزش نسبی بین المان میله‌ای و المان چهار وجهی رخ نمی‌دهد. بتن در حالت تنش دو محوره به صورت یک جسم ارتوتروپیک در جهات اصلی دارای رابطه سازگاری به صورت:

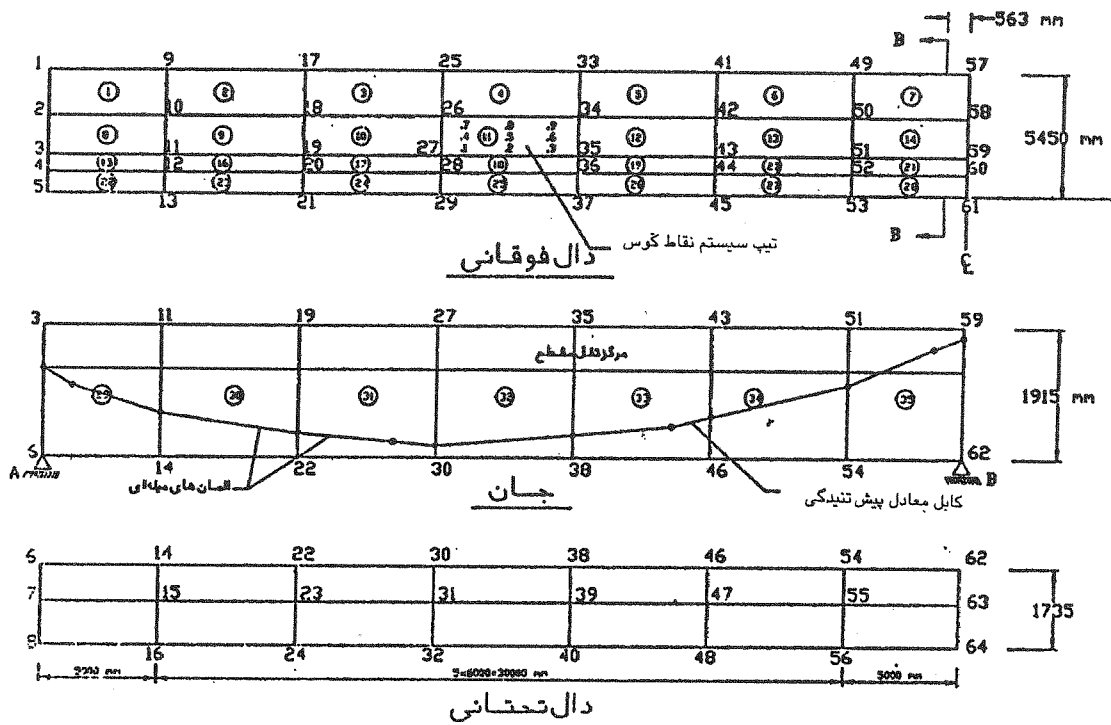
$$\{\Delta\sigma\} = [D] \{\Delta\epsilon\}$$

بوده که ماتریس D ، ماتریس سازگاری نامیده می‌شود. در حالت کلی برای بتن می‌توان از دو مدل رفتاری استفاده نمود: روش اول، مدل سازگاری هیپوالاستیکی است که در آن شکست بتن به صورت الاستیک غیرخطی بررسی می‌گردد. روش دوم مدل الاستوپلاستیک است که در آن شکست بتن به صورت پلاستیک همراه با پدیده سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده و در مطالعات حاضر نیز از این مدل استفاده شده است.

جدول (۱) تنش‌ها و ضرایب ارتجاعی بر حسب E^* , Mpa مدول کرنش سخت‌شوندگی

بتنی								
f'_c	$10^6 \epsilon_{cu}$	$10^6 \epsilon_u$	f'_t	$10^6 \epsilon_{tu}$	E_{co}	ν_c	$10^6 \alpha_{\epsilon,c}$	f'_{bc}
۳۰	۲۰۰۰	۳۵۰۰	۲/۵	۴۰۰	۲۶۰۰	۰/۱۵	۸	۳۷/۵

فولاد معمولی					فولاد پیش‌تندگی			
f_{cy}	E_s	E_s^*	$10^6 \epsilon_{cu}$	$10^6 \alpha_{\epsilon,ts}$	f_{py}	E_{ps}	E_{ps}^*	$10^6 \epsilon_{ps}$
۴۰۰	۲۰۰۰۰۰	۰	۱۲۰۰۰۰	۱۲	۱۴۰۰	۲۰۰۰۰۰	۰	۶۰۰۰۰



شکل (۳) مدل اجرا محدود مقطع عرضی پل آنالیز غیرخطی تنش‌ها (تنها نیمی از صندوقه در یک دهانه آنالیز گردیده)

اعمال بارگذاری حرارتی، یک سری ترک‌های اساسی در دال تحتانی و جان صندوقه ایجاد شده که منجر به کاهش سریع عکس‌العمل و در آخر لنگر پیوستگی ناشی از بار حرارتی در تکیه‌گاه میانی پل می‌شود که به علت کاهش سختی خمشی مقطع عرضی پل بعد از ترک خوردگی است. در نمودار (۶) تغییرات خیز (تغییر شکل) وسط دهانه برحسب افزایش درجه حرارت در هر مرحله بارگذاری ارائه شده است. این خیز منفی، و به سمت بالا بوده و به محض ایجاد ترک در دال تحتانی و جان صندوقه (در مرحله هفتم بارگذاری)، خیز منفی وسط دهانه به شدت افزایش یافته ولی بعد از آن نرخ رشد کاهش خواهد یافت. در نمودار (۷) تغییرات تنش فشاری ماکزیمم بتن در دال فوقانی در نزدیکی تکیه‌گاه میانی پل ترسیم شده است. براساس این منحنی‌ها و با افزایش درجه حرارت، میزان تنش فشاری افزایش یافته تا جان و بال تحتانی ترک نخورند. از این مرحله به بعد میزان نرخ رشد تنش فشاری بتن کاهش یافته و پدیده باز توزیع تنش در مقطع سبب کاهش نرخ رشد تنش‌های فشاری خواهد گردید.

ارائه نتایج: ابتدا بارگذاری حرارتی به صورت مجزا و بدون بارهای دائمی و پیش‌تنیدگی بررسی می‌شود. بارگذاری حرارتی در ده مرحله مساوی بر پل اعمال شده و با آنالیز مدل و استخراج مقادیر مختلف، نتایج حاصله با مقادیر حاصل از آنالیز خطی، مقایسه شده است. نمودار (۴) توزیع تنش‌های نرمال در طول خط تقارن جان صندوقه را بر حسب ارتفاع نشان می‌دهد. در این مورد تفاوت بین نتایج آنالیز خطی و غیرخطی قابل توجه است. در واقع ایجاد ترک در جان و دال تحتانی سبب ساز توزیع تنش‌ها و تقلیل تنش در بعضی از بخش‌های مقطع شده است. تغییرات عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی انتهایی برحسب افزایش درجه حرارت در دو حالت آنالیز در نمودار (۵) ارائه شده است. با توجه به اینکه لنگر هیپراستاتیک بر مبنای این عکس‌العمل محاسبه می‌گردد. تغییرات آن در محاسبات قابل توجه خواهد بود در این حالت نیز بعد از ایجاد ترک در مقطع، نسبت تغییرات عکس‌العمل تکیه‌گاهی برحسب افزایش درجه حرارت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. براساس مطالعات انجام شده در مرحله هفتم

نمودارهای (۸ تا ۱۰) تغییرات پارامترهای فوق الذکر را تحت اثر ترکیب بارهای دائمی، اثر پیش تنیدگی و بار حرارتی با نرخ رشد افزایشی که طی مراحل مختلف به سازه اعمال می‌گردد، نشان می‌دهد. براین اساس، با افزایش درجه حرارت عکس‌العمل‌های دوسر (انتهایی) افزایش و عکس‌العمل تکیه‌گاه میانی کاهش می‌یابد. باتوجه به رفتار غیرخطی مصالح، نرخ رشد عکس‌العمل R_A در مراحل مختلف بارگذاری ثابت نبوده و با ایجاد ترک، شیب منحنی ملایم‌تر می‌شود. در مورد خیز وسط دهانه، باتوجه به اثر کمک‌کننده لنگرهای خمشی حرارتی، در آنالیز خطی با افزایش درجه حرارت از خیز مثبت وسط دهانه کم شده، اما در بررسی رفتار غیرخطی، مسیر برگشتی مجزا از مسیر بارگذاری بوده و یک سری تغییر شکل‌های ماندگار در مصالح باقی می‌ماند.

بررسی نتایج آنالیز با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل: در این بخش به منظور ارزیابی نتایج مطالعات، یک مدل پل واقعی مطابق شکل (۱۱) که تغییرات درجه حرارت در یک دوره زمانی در نقاط مختلف آن اندازه‌گیری شده، انتخاب و با المان بندی آن مطابق شکل (۱۲) تحت حالت‌های مختلف بارگذاری آنالیز شد. در مطالعات فرض شده که انتقال حرارت در فضای داخلی صندوقه تنها به صورت هدایتی صورت می‌گیرد. ضخامت متوسط روسازی ۳۸ میلی‌متر و ضریب جذب آن ۰/۹ فرض شده و ضریب انتشار برای سطوح خارجی معادل ۰/۹۴ منظور گردیده است. دفع انرژی به صورت تشعشعی و کنوکسیون براساس شرایط محیط اطراف در درجه حرارت سایه و در شب هنگام در نظر گرفته شده و مقادیر براساس درجه حرارت هوا که کمتر از ۱۱ درجه بوده، محاسبه گردیده است. نمودار (۱۳) مقایسه نتایج درجه حرارت تئوریک و واقعی در نقاط مختلف صندوقه را نشان می‌دهد. این مقایسه برای یک پل پیوسته دیگر به طول ۲۱۱ متر و مدل‌های آزمایشگاهی نتایج مشابهی را می‌دهد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که علیرغم طبیعت تجربی قوانین تبادل حرارتی و نبودن اطلاعات دقیق از شرایط محیطی اطراف پل، نتایج حاصل از محاسبات با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی به خوبی مطابقت دارد و روش اجزاء محدود به عنوان روشی مناسب جهت پیش‌بینی تغییرات درجه حرارت قابل استفاده می‌باشد.

روش پیشنهادی: براساس مطالعات تئوریک انجام

شده، برای تغییرات درجه حرارت در مقاطع توپر، سلولی و صندوقه‌ای (نمودار ۴) و به منظور بیان این تغییرات در ارتفاع مقطع می‌توان یک منحنی درجه پنجم که از روی دال عرشه شروع شده و در عمق ۱/۲ متر به صفر می‌رسد، تعریف نمود.

$$t(y) = 25 \left(\frac{y}{1200} \right)^5$$

اما این منحنی در امتداد دال‌های فوقانی و تحتانی تطبیق دقیقی با مقادیر واقعی ندارد.

لذا با توجه به جمیع اطلاعات کسب شده، بررسی و آنالیز مدل‌های مختلف، اندازه‌گیری‌های انجام شده روی پل‌های واقعی و نمونه‌های آزمایشگاهی، و با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی ایران، می‌توان گرادیان غیرخطی پیشنهادی را مطابق نمودار (۱۵) و به شرح زیر تعریف نمود:

الف) قسمت اول شامل یک منحنی درجه پنجم به عمق ۱/۲ متر با درجه حرارت T روی دال عرشه.

درجه حرارت T برحسب ضخامت پوشش روسازی به صورت

$$T = 35 - 0.2h^{oc}$$

تعریف می‌گردد h ضخامت پوشش برحسب میلی‌متر است.

$$t_y = t \left(\frac{y}{1200} \right)^5$$

ب) قسمت دوم شامل یک گرادیان خطی درجه حرارت بر روی دال عرشه

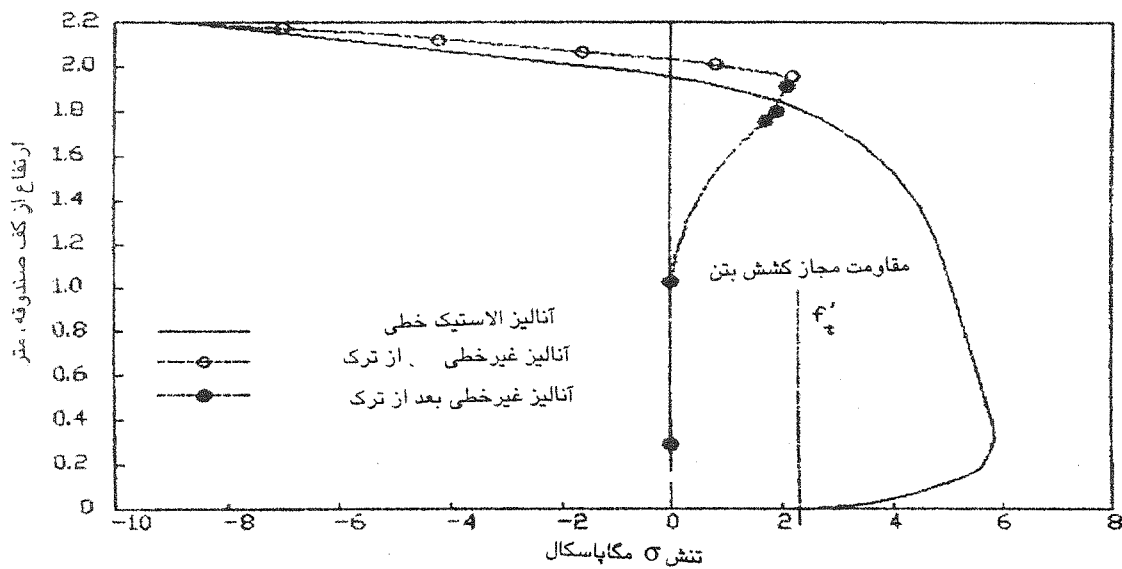
$$t_{yt} = 5 - 0.05h^{oc}$$

ج) قسمت سوم شامل افزایش خطی درجه حرارت از مقدار صفر تا ۱/۵ روی ضخامت دال تحتانی در مقطعی که ارتفاع آنها از ۱/۴ متر کمتر باشد. این قسمت بر منحنی درجه پنجم منطبق خواهد بود.

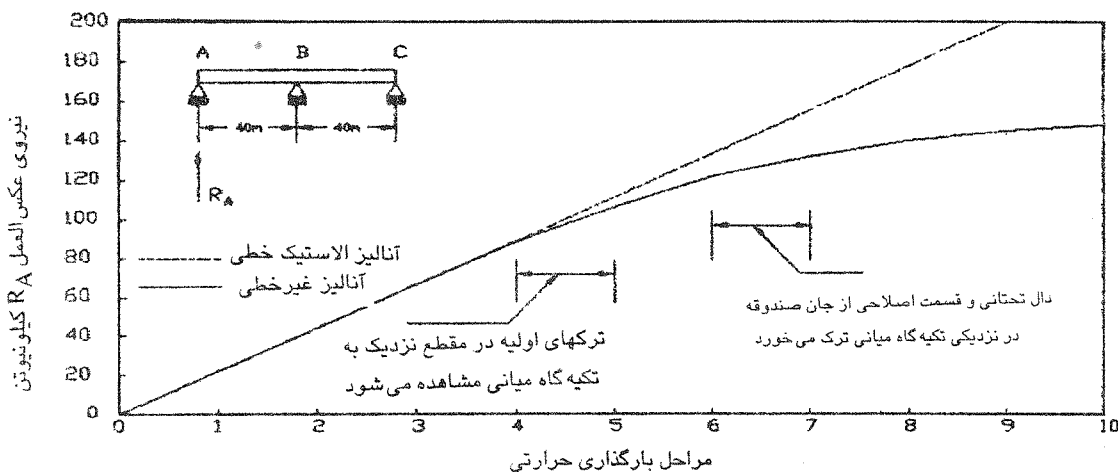
به منظور ارزیابی نهایی گرادیان پیشنهادی، اثر آن بر روی مدل پل دو دهانه قبلی تعیین گردیده و با آثار حاصل از گرادیان پیشنهادی در آئین‌نامه‌های مختلف مقایسه شده است (نمودار ۱۶).

براساس نتایج حاصله روابط پیشنهادی دقت مطلوبی داشته و به منظور آنالیز حرارتی پل‌های صندوقه‌ای می‌تواند با اطمینان کافی مورد استفاده قرار گیرد.

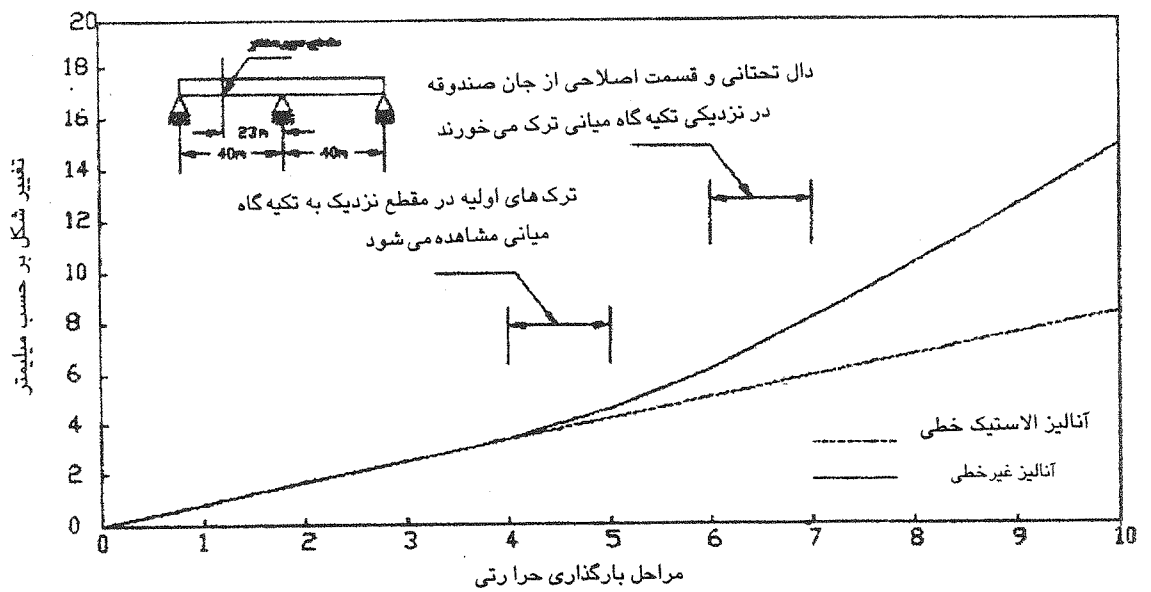
- [1] A. C. I - ASCE "Analysis and Design of reinforced Concrete Bridges" Committee 343-Detroit Michigan-1988.
- [2] AASHTO "Standard specifications for Highway bridges" Washington D. C. 1991.
- [3] PRIESTLEY, M. J. N. "Thermal Gradients in Bridges, some design consideration" New Zealand Engineering Vol. 1 1972.
- [4] RAHMAN, F. and George, K.P. "Thermal stresses in skew Bridge by Model Test" Journal of the structural Division-ASCE 1980.
- [5] New Zealand Ministry of works "Highway Bridge Design Brief" Issue B-1972.
- [6] LANIGAN, A. G. "The Temperature Response of concrete Box girder Bridges" Report No. g 4 University of Auckland-New Zealand 1973.



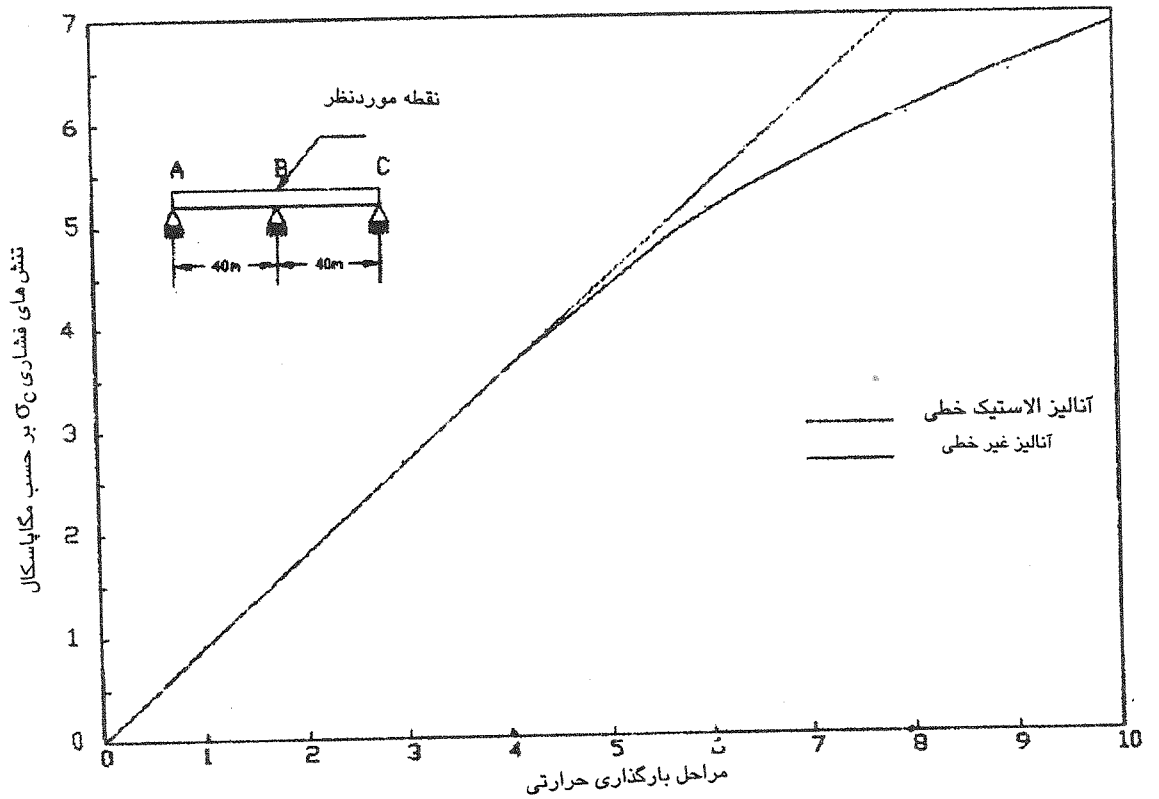
شکل (۴) توزیع تنش های نرمال در طول خط تقارن جان صندوقه در نزدیکی تکیه گاه میانی تحت اثر بارگذاری حرارتی



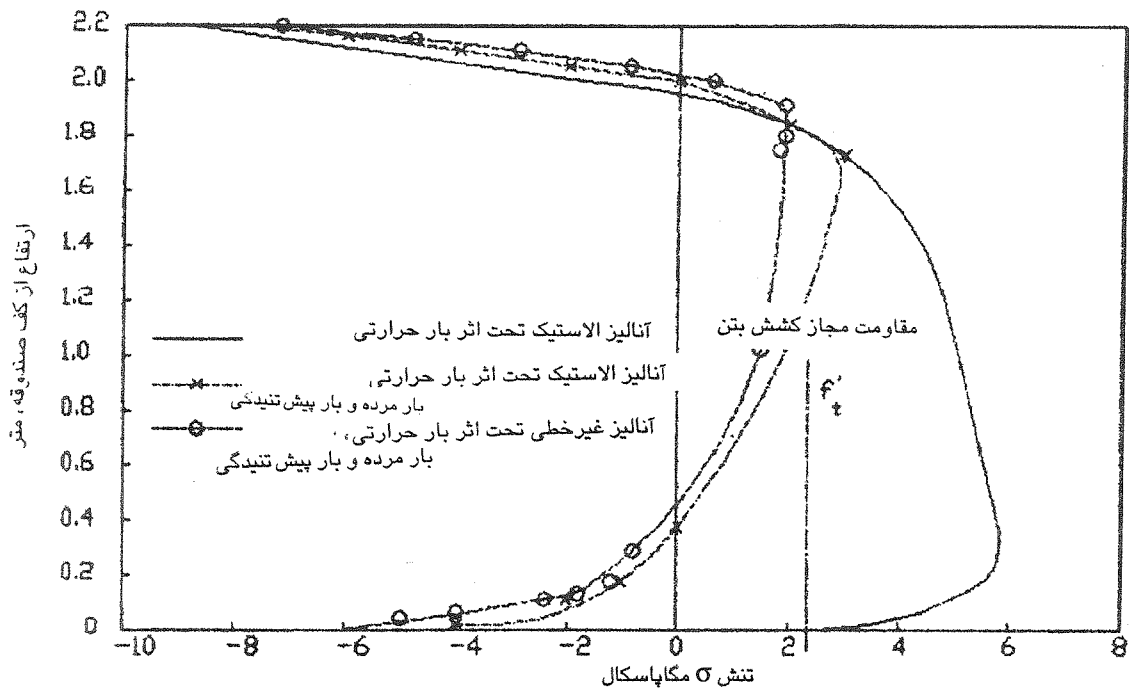
شکل (۵) تغییرات نیروی عکس العمل تکیه گاه انتهایی ناشی از بارگذاری حرارتی با ضریب



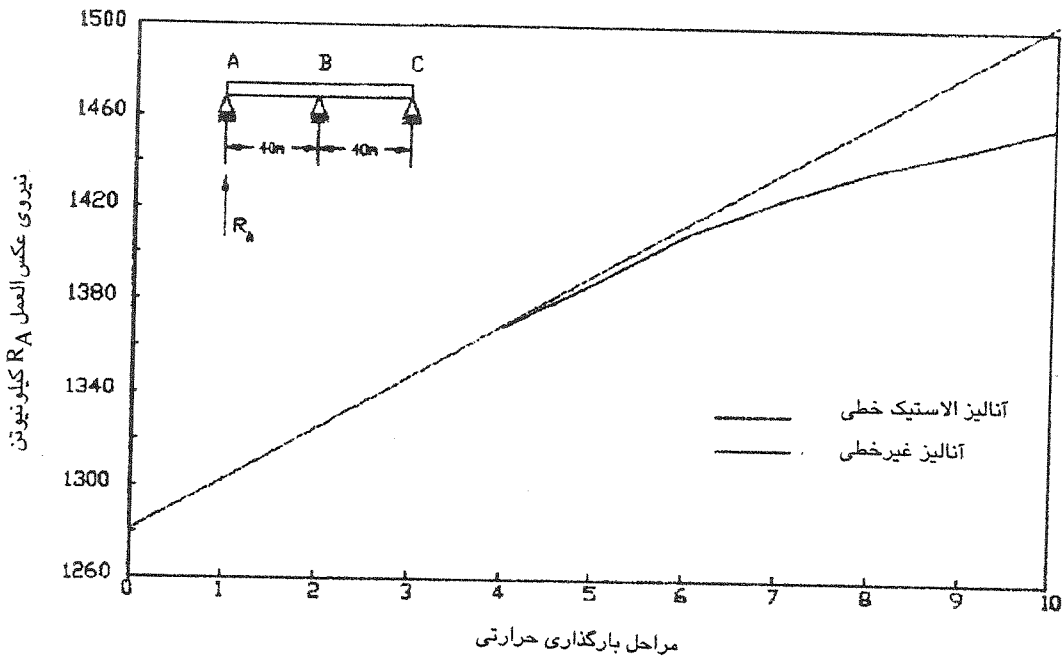
شکل (۶) تغییرات تغییر شکل تا پایه پل در نزدیکی وسط دهانه تحت اثر بارگذاری حرارتی با ضریب



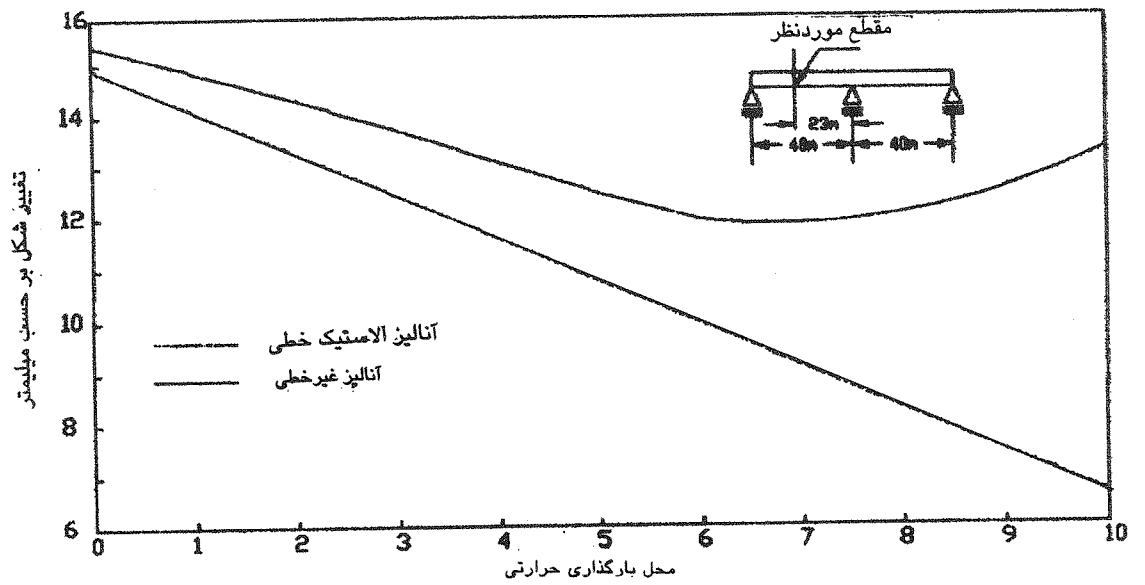
شکل (۷) تغییرات تنش های فشاری پل در امتداد محور اصلی تحت اثر بارگذاری حرارتی به ضریب



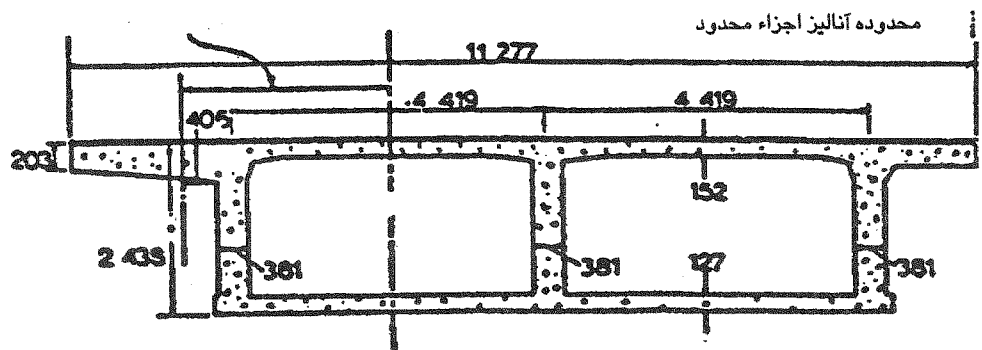
شکل (۸) توزیع تنش های نرمال در طول خط تقارن جان صندوقه در نزدیکی تکیه گاه میانی تحت اثر بارگذاری حرارتی و بار مرده و بار پیش تنیدگی



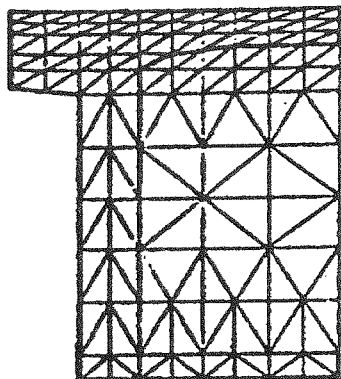
شکل (۹) تغییرات نیروی عکس العمل تکیه گاه انتهایی ناشی از بار حرارتی بار مرده و بار پیش تنیدگی از پیش تنیدگی



شکل (۱۰) تغییرات تغییر شکل تا پایه پل در نزدیکی وسط دهانه تحت اثر بار حرارتی، بار مرده و بار پش تنیدگی

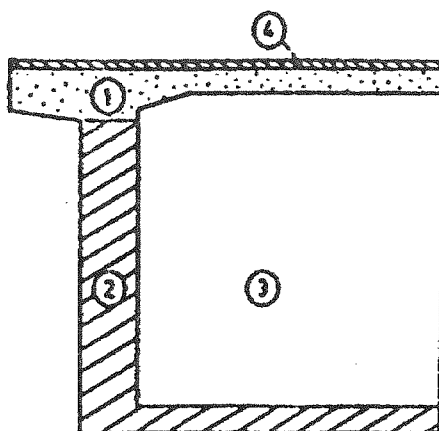


شکل (۱۱) نیمی از مقطع عرضی تیب



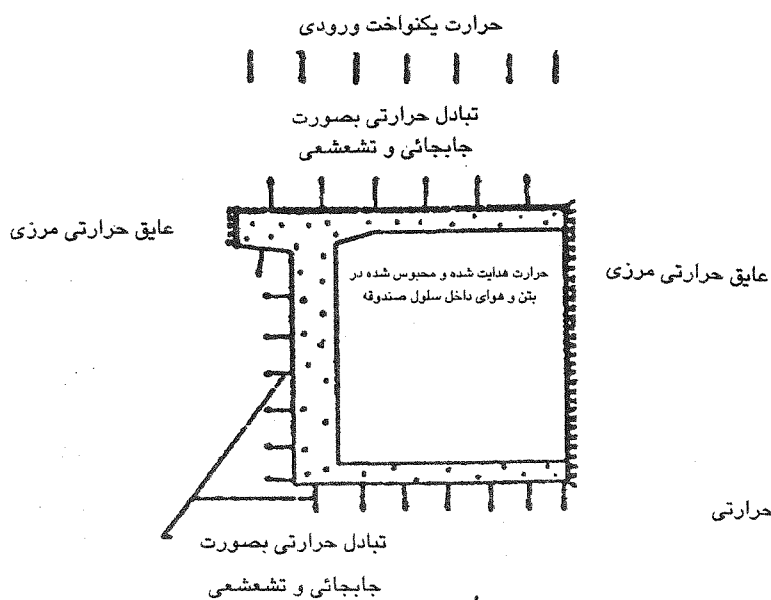
ایجاد شبکه
نقاط کمره‌ای = ۱۰۰
المانها = ۱۵۰

الف) نمایش المانهای محدود



تذکر: اعداد داخل دایره نشاندهنده تیب مصالح مشخص شده در جدول ۱-۶ می باشد.

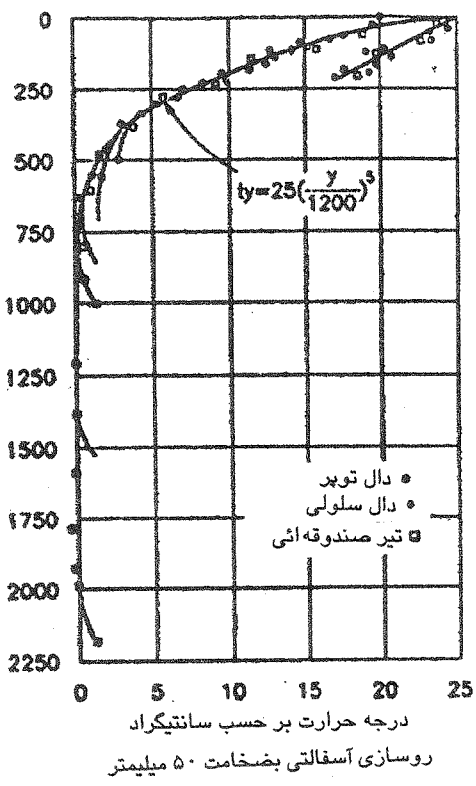
ب) توزیع خصوصیات حرارتی



ج) نمایش شماتیک بالانس حرارتی

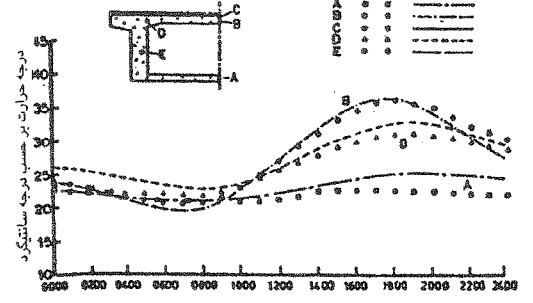
شکل (۱۲) جزئیات آنالیز

ارتفاع از کف مقطع بر حسب میلیمتر

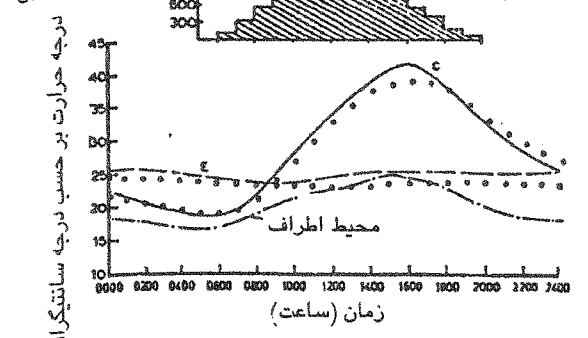


شکل (۱۲) گزادیان بهرانی درجه حرارت برای آنالیز انتقال حرارت

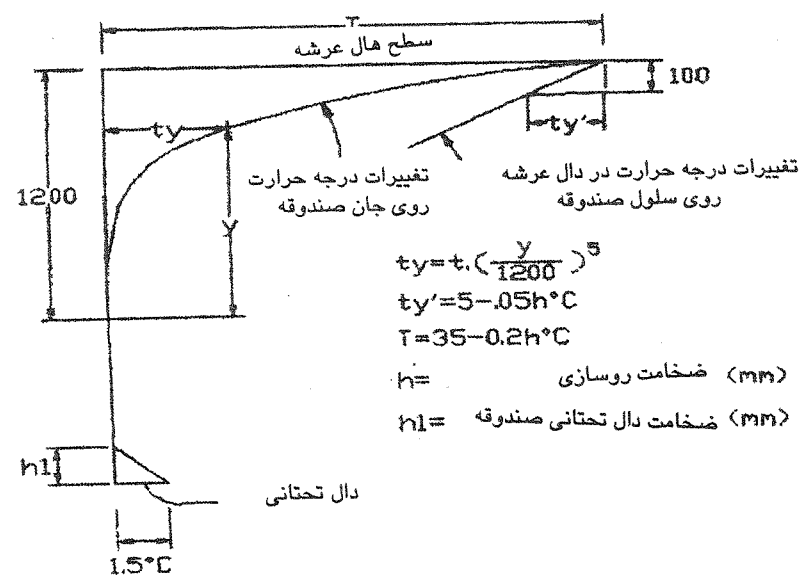
نتایج واقعی نتایج تئوری



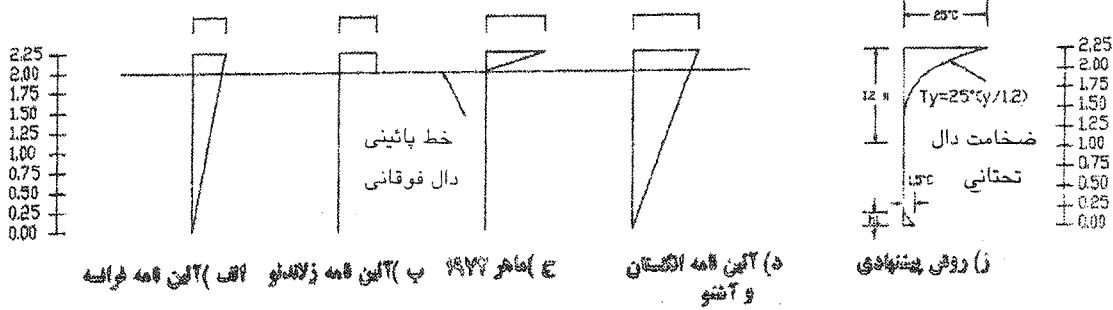
یستوگرام حرارت ورودی خورشیدی



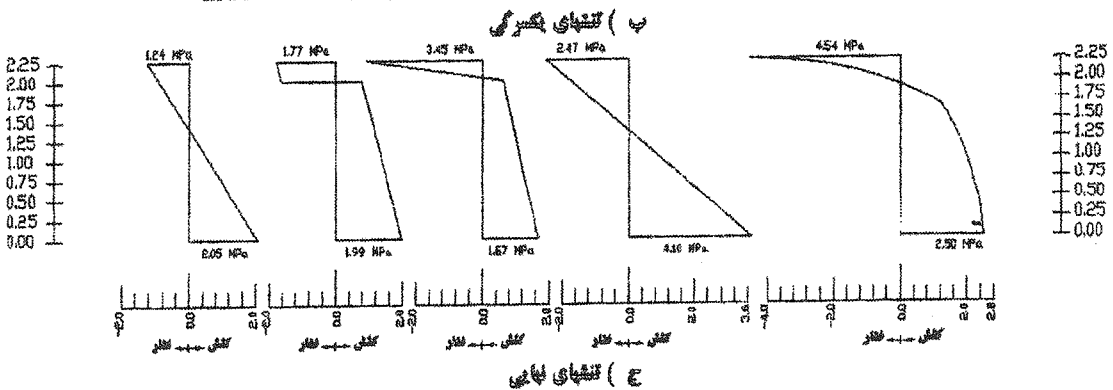
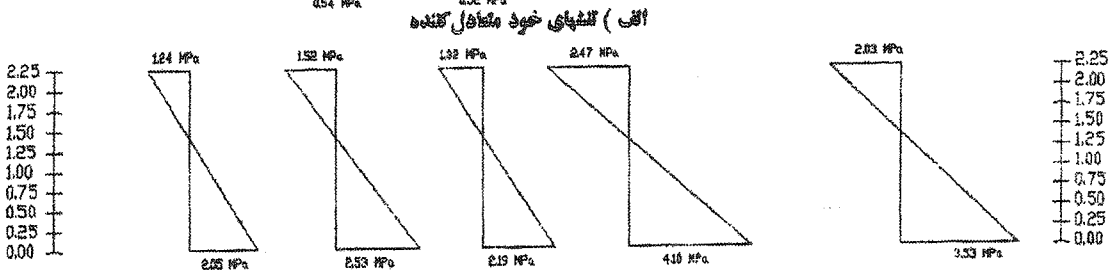
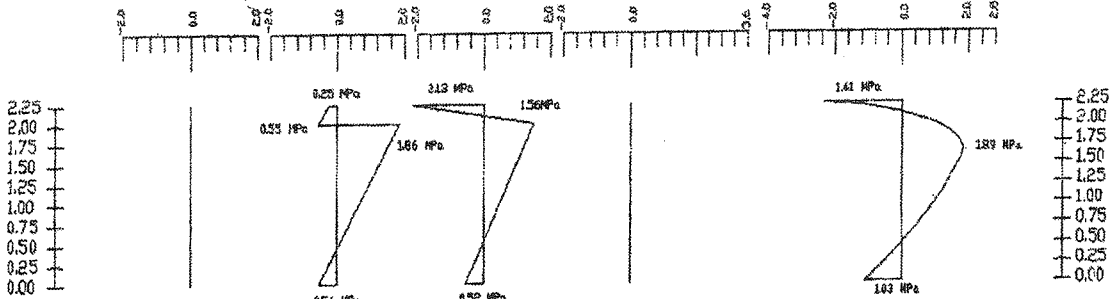
شکل (۱۳) مقایسه ای بین نتایج تئوری و نتایج اندازه گیری شده در محل



شکل (۱۵) گزادیان حرارتی پیشنهادی



گرادانهای حرارتی وارد در مقطع



شکل (۱۶) تنش های حاصل از گرادیان حرارتی در مقطع